

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA FACULDADE DE  
CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS**

**CAMPUS DE JABOTICABAL**

**USO DO SILÍCIO NA ATENUAÇÃO DOS DANOS CAUSADOS PELA  
DEFICIÊNCIA MODERADA DE FERRO EM PLANTAS DE CANA-ENERGIA**

**MURILO BASSAN PRINCI**

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Renato de Mello Prado

**COORIENTADORES:** Dr. Antônio Márcio Souza Rocha

Dra. Gelza Carliane Marques Teixeira

**Jaboticabal-SP**

**2022**

P957u Princi, Murilo Bassan  
Uso do silício na atenuação dos danos causados pela  
deficiência moderada de ferro em plantas de cana-energia /  
Murilo Bassan Princi. -- Jaboticabal, 2022  
29 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia  
Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),  
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal  
Orientador: Renato de Mello Prado  
Coorientador: Antônio Márcio Souza Rocha

1. Ferro. 2. Micronutrientes. 3. Cana-de-açúcar. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da  
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo  
autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
CÂMPUS DE JABOTICABAL

DEPARTAMENTO: Ciências da Produção Agrícola

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**  
TRABALHO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

TÍTULO : USO DO SILÍCIO NA ATENUAÇÃO DOS DANOS CAUSADOS PELA DEFICIÊNCIA  
MODERADA DE FERRO EM PLANTAS DE CANA-ENERGIA

ACADÊMICO: Murilo Bassan Princi



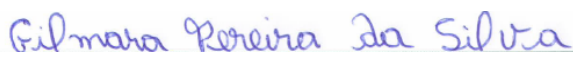
CURSO: Engenharia Agrônômica

ORIENTADOR (ES): Prof. Dr. Renato de Mello Prado

COORIENTADOR: Dra. Gelza Carliane Marques Teixeira  
Dr. Antônio Márcio Souza Rocha

Aprovado e corrigido de acordo com as sugestões da Banca Examinadora

**BANCA EXAMINADORA:**

	(Nomes)	(Assinaturas)
<b>Presidente</b>	Prof. Dr. Renato de Mello Prado	
<b>Membro</b>	Dr. Jonas Pereira de Souza Júnior	
<b>Membro</b>	Dra. Gilmara Pereira da Silva	

Jaboticabal 26 / 02 / 2022

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em: 23 / 03 / 2022



\_\_\_\_\_  
Chefe do Departamento

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

Murilo Bassan Princi, filho de Peterson Melquior Princi e Iolanda Cristina Bassan Princi, nascido em 23 de julho de 1999 em São José do Rio Preto, São Paulo. Durante a graduação em Engenharia Agrônoma pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, FCAV – Unesp, Câmpus de Jaboticabal realizou estágio no GENPLANT, laboratório onde desenvolveu seu Trabalho de Iniciação Científica aqui apresentado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus pelo dom da vida e por me proporcionar todos esses momentos rodeado de pessoas do bem.

Agradeço aos meus pais Peterson e Iolanda e minha irmã Gabriela, por me apoiarem e incentivarem em todos os momentos durante esta caminhada.

Agradeço aos meus amigos Pedro Henrique, Marcelo, Bruno, Reinaldo e Ygor pelo companheirismo e amizade que levarei para sempre.

Agradeço ao meu orientador Dr. Renato de Mello Prado pela oportunidade e por todo o aprendizado.

Agradeço aos meus coorientadores Dr. Antônio Márcio Souza Rocha e Dra. Gelza Carliane Marques Teixeira por todos os ensinamentos transmitidos e por toda a ajuda durante esta etapa.

Agradeço a todos profissionais da FCAV que, de alguma forma, contribuíram na execução desse trabalho.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1 Cana-energia</b> .....	<b>11</b>
<b>2.2 A importância do ferro (Fe) para as plantas</b> .....	<b>13</b>
<b>2.3 Uso do silício (Si) na atenuação da deficiência de ferro</b> .....	<b>15</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1 Tratamento e Delineamento experimental</b> .....	<b>18</b>
<b>3.2 Variáveis analisadas</b> .....	<b>19</b>
3.2.1 Eficiência quântica do fotossistema II (PSII) .....	20
3.2.2 Conteúdo de clorofilas e carotenoides .....	20
3.2.3 Índice de extravasamento de eletrólitos .....	20
3.2.4 Produção de massa seca .....	20
3.2.5 Concentração de Si .....	21
3.2.6 Concentração de Fe .....	21
3.2.7 Eficiência na absorção, translocação e utilização do ferro .....	21
<b>3.3 Análise estatística</b> .....	<b>21</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>22</b>
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	<b>30</b>
<b>Referências Bibliográficas</b> .....	<b>31</b>

## RESUMO

A cana-de-açúcar se destaca mundialmente por ser uma das culturas mais versáteis na agricultura, com ampla quantidade de subprodutos gerados a partir da matéria-prima. Entre elas, podemos destacar a cana-energia (*S. spontaneum* L.), espécie que possui como principal característica o maior teor de fibras e menor teor de sacarose, destinada principalmente à produção de energia limpa e etanol de segunda geração. O silício (Si), considerado elemento benéfico para as plantas, é considerado uma ótima alternativa para elevar os índices de produção. Quando adicionado na solução nutritiva, o Si proporciona diversas vantagens fisiológicas para as plantas impactando positivamente nos valores de produção, principalmente para as consideradas acumuladoras de Si, como é o caso da cana-energia. Assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar o Si na mitigação dos estresses causados pela deficiência moderada de ferro (Fe) na cana-energia cultivar VX3. O trabalho foi conduzido em ambiente controlado. Foram utilizadas mudas pré-brotadas (MPB) de cana-energia cultivar VX3 e os tratamentos utilizados foram configurados em esquema fatorial 2x2, onde o primeiro fator era composto pela suficiência e deficiência de Fe e o segundo fator pela presença (+Si) ou ausência (-Si) do Si. No preparo da solução, utilizou-se o Fe-EDDHA 368  $\mu\text{mol L}^{-1}$  como fonte de Fe e o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol 2,5  $\text{mmol L}^{-1}$  como fonte de Si. As adubações com silício foram feitas através de fertirrigação e pulverização foliar. As seguintes variáveis foram analisadas: eficiência quântica no fotossistema II (PSII); conteúdo de clorofilas e carotenoides; índice de extravasamento de eletrólitos; produção de massa seca; concentração de Si e Fe, e eficiência na absorção, translocação e utilização do Fe. Os resultados mostraram que o Si foi eficiente na atenuação dos estresses causados pela deficiência moderada de ferro na cultivar VX3 de cana-energia, que por sua vez se mostrou sensível à deficiência férrica.

**Palavras-chave:** *Saccharum spontaneum* L, elemento benéfico, micronutriente, deficiência nutricional

## ABSTRACT

Sugarcane stands out worldwide for being one of the most versatile crops in the region, with a large amount of agricultural by-products generated from the raw material. Among them, we can highlight the energy cane (*S. spontaneum* L.), species that have as their main characteristic or higher fiber content and lower sucrose content, mainly for the production of clean energy and ethanol generation. The (Si), considered a great alternative to change the production indices. When added to the nutrient solution, Si offers several biological alternatives for plants, positively impacting production values, especially for the accumulated values in the case of Si, as is the case with can-energy. Thus, the objective of this study was to evaluate the Si work in the mitigation of work problems based on the measurement of iron (Fe) in energy cane cultivar VX3. The work was controlled in a controlled environment. Pre-sprouted seedlings (MPB) of energy cane cultivar VX3 were used and the treatments used were configured in a second factor 2x2, where the first factor was composed by the sufficiency and deficiency of Fe and the factor by the presence (+Si) or absence (-Si) of Si. In the preparation of the solution, Fe-EDHA was used as a source of 68  $\mu\text{mol L}^{-1}$  as a source of and the silica stopped at 33 and could stabilize with sorbitol 2.5  $\text{mmol L}^{-1}$  of 2.5  $\text{mmol L}^{-1}$ . Fertilizations with silicon were made through fertigation and foliar spraying. The following variables were: quantum efficiency in photosystem II (PSII); chlorophyll and carotenoid content; electrolyte extravasation index; dry mass production; concentration of Si and Fe, and efficiency in the absorption, translocation and utilization of Fe. The stresses projected by the iron deficiency in the cultivar VX3 of energy cane, in turn, proved to be efficient.

**Keywords:** *Saccharum spontaneum* L, beneficial element, micronutrient, nutritional deficiency

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). A maior parte dessa produção é destinada para a produção de etanol e açúcar, utilizando espécies com alto teor de açúcares e baixo rendimento de fibras e biomassa. Entretanto, o número de estudos sobre a utilização de biomassa como fonte de energia renovável tem aumentado nos últimos anos (MATSUOKA et al., 2014).

A cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.), híbridos de *Saccharum* spp., são selecionadas para apresentar maior conteúdo de fibra do que de sacarose em sua composição e alta produção de biomassa (MATSUOKA et al., 2014), apresentando o dobro de fibras e de produção de biomassa ( $t\ ha^{-1}$ ) e metade da concentração de açúcares solúveis em relação a cana convencional (YANAGUI et al., 2016).

A cana-energia apresenta alta adaptabilidade em solos pouco férteis, altas taxas de perfilhamento e propagação e boa resistência à estresses bióticos e abióticos (YANAGUI et al., 2016). O potencial da cana-energia como fonte de energia renovável é alto, podendo oferecer grandes oportunidades para o Brasil aumentar sua competitividade no seguimento, com benefícios à sociedade (MATSUOKA et al., 2012). Além disso, a cana-energia possui maior tolerância a estresses ambientais, sendo uma opção para o cultivo em solos de baixa fertilidade (LEAL et al., 2013).

Contudo, um dos problemas globais que limita a produção agrícola é a ocorrência de solos alcalinos que constituem 30% dos solos agrícolas do mundo e ocorrem em diferentes regiões (GUERINOT e YI, 1994). Nessas condições ocorre baixa disponibilidade de micronutrientes, especialmente do ferro (Fe) (ABBASZADEH-DAHAJI et al., 2020), um nutriente com alta demanda por plantas da família *Poaceae* (CAVALCANTE et al., 2016), como a cana-energia. Portanto, os cultivos nestes solos induzem deficiência férrica moderada ou severa dependendo da espécie ou cultivar (GONZALO et al., 2013), não sendo conhecida a resposta da cana-energia cultivada neste ambiente.

O Fe se relaciona a inúmeras atividades metabólicas, como constituinte e ativador enzimático, biossíntese de proteínas e clorofila, além de estar envolvido no metabolismo do nitrogênio (N) (ALEXANDRE et al., 2012). O principal sintoma da deficiência de Fe é a clorose internerval, formando estrias longitudinais por toda a folha (PRADO, 2021). Em casos mais críticos, as folhas ficam brancas e as pontas secam (ORLANDO FILHO et al., 2015).

Dessa forma, acredita-se que o cultivo de cana-energia em áreas de baixa fertilidade pode causar deficiência férrica que limita a produção canavieira, apesar da cana-energia apresentar maior tolerância. Nesse sentido, o fornecimento de silício (Si), que é considerado elemento benéfico para as plantas, pode ser uma forma de aumentar a tolerância das plantas cultivadas sob estresse por deficiência de Fe (MIYAKE e TAKAHASHI, 1985).

O Si pode ser utilizado como mitigador de deficiências de micronutrientes por diminuir os danos causados e manter as taxas fotossintéticas, transpiração e condutância estomática (MUNEER e JEONG, 2015). O fornecimento do Si e o aumento da atividade de seus transportadores favorece a absorção e translocação de Fe, amenizando os danos causados pela falta do micronutriente (FU et al., 2012)

Em plantas com deficiência nutricional o Si pode ser usado porque atua na preservação dos pigmentos fotossintéticos observados em plantas de sorgo (*Sorghum bicolor*) sob deficiência férrica (TEIXEIRA et al., 2020). Isso ocorre pois o Si está ligado à ativação de genes estimuladores dos sistemas antioxidantes, que ajudam a manter a integridade da membrana e reduzir a degradação de pigmentos fotossintéticos em plantas submetidas à estresses (SOUSA JÚNIOR, 2020).

Os efeitos do Si são mais evidentes em plantas que absorvem maiores quantidades do elemento, como é o caso da cana-energia, pertencente à família *Poaceae*, consideradas plantas acumuladoras de Si uma vez que possuem transportadores específicos para a absorção do elemento via raízes (KORNDORFER et al., 1999), sugerindo que a deficiência férrica em cana-energia pode ser atenuada com o fornecimento desse elemento às plantas.

Assim, são necessárias novas pesquisas com o intuito de aprimorar as técnicas de obtenção de uma fonte de energia renovável do setor sucroenergético. Com isso, hipotetizou-se que os mecanismos do Si para atenuar a deficiência férrica em cultivares de cana-energia se deve ao aumento do acúmulo de Fe e da eficiência nutricional, atenuando o estresse a partir da diminuição do extravasamento de eletrólitos celular ao aumentar o composto antioxidante carotenoide e conseqüentemente, o conteúdo de clorofila, a eficiência fotossintética e a produção de massa seca.

Sendo aceita essa hipótese permitirá uso do Si nos cultivos de cana-energia em ambientes deficiente de Fe. Esse uso terá impacto importante pois existe tendência global para aumentar a geração de energia renovável a partir da biomassa da cana-energia que é exigente em Fe.

Desse modo, o estudo objetivou avaliar parâmetros fotossintéticos e nutricionais através do uso do Si na mitigação dos efeitos causados pela deficiência moderada do micronutriente ferro na cana-energia.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Cana-energia**

Estudos com espécies de *Saccharum* spp. são muito recorrentes por conta da versatilidade do gênero, sua capacidade de adaptação em diversos climas e, principalmente, pela ampla oferta de produtos e formas que a mesma pode oferecer (OKUNO, 2019). No Brasil, grande parte da cana-de-açúcar cultivada é proveniente de uma série de cruzamentos que predominam as características da espécie *Saccharum officinarum*, apresentando maior quantidade de açúcar e baixo teor de fibras (MARIANO, 2015).

Na década de 1970, melhoristas norte-americanos buscaram desenvolver uma espécie com maior rendimento de biomassa, a fim de melhorar os índices de produtividade que estavam em decadência na região (MATSUOKA et al.,

2014). Aliado a isso, a possibilidade de utilizar a cana-de-açúcar como fonte de energia renovável levou à intensificação dos estudos no intuito de produzir uma espécie com maior teor de fibras. Assim, surgiu-se o conceito da cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (MATSUOKA et al., 2014)

A cana-energia é resultante do cruzamento de espécies comerciais com espécies mais ancestrais, com intuito de produzir um híbrido onde o teor de fibras seja maior e o de sacarose menor, gerando uma matéria-prima com grande potencial energético (MATSUOKA et al., 2014). A espécie é um exemplo da diversa gama de possibilidades que o gênero *Saccharum* pode oferecer ao setor, com potencial de promover mudanças impactantes no setor da bioeletricidade e do bioetanol (SILVEIRA, 2019).

Os estudos com a espécie no Brasil teve início na década de 1980, mas o projeto não prosseguiu. Em 2002, com o mercado mais maduro e a necessidade de uma fonte limpa de energia, retomou-se as pesquisas e possibilitou novos investimentos em cogeração de energia e etanol de segunda geração através da cana-energia (MARIANO et al., 2013).

Atualmente, diversas instituições realizam programas de melhoramento com plantas do gênero *Saccharum* spp. Podemos citar o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), a Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA) e o Instituto Agrônômico (IAC) como exemplo de públicas e a GranBio, Syngenta e Vignis entre as privadas. Vale ainda ressaltar que as empresas GranBio e Vignis possuem programas de melhoramento específicos para a cana-energia (OKUNO, 2016).

Segundo Mariano (2015), o potencial da cana-energia está diretamente ligado à grande quantidade de rizomas presentes na espécie, característica essa que, na cana convencional, foi perdida com o passar dos anos uma vez que o intuito era a maior produção de açúcares. O rizoma é um tipo de caule subterrâneo que, em conjunto com um sistema radicular vigoroso, acelera e aumenta a absorção de nutrientes pela planta além da maior produção de fibras.

Com a maior produção de fibras, a espécie apresenta inúmeras vantagens como maior rusticidade, sendo mais tolerante aos solos de baixa fertilidade e à falta de água e macro e micronutrientes. Sendo assim, a cana-energia pode ser utilizada em áreas marginais que têm como características a baixa disponibilidade de nutrientes e recursos hídricos, além de contribuir para a contenção de erosões e recuperação de áreas degradadas (CAVERSAN, 2017 ; VIOLANTE, 2012).

Pela alta eficiência de absorção de nutrientes, a cana-energia brota mais rápido e com alta taxa de perfilhamento, conferindo ao canavial vida mais longa e altas produtividades (BARROS, 2020). O tempo de replante da cana-energia ocorre em torno do 10 anos, enquanto o da cana convencional é de apenas 5 anos (MARIANO, 2015).

Matsuoka et al. (2012) atribuiu também à cana-energia várias vantagens como redução do efeito estufa, alta conversão do C atmosférico em C orgânico, redução do consumo de petróleo e alta densidade de energia. Segundo Mariano (2015), é preciso tempo para a espécie entrar plenamente na rotina das usinas e se firmar no setor sucroalcooleiro brasileiro.

Apesar da maior rusticidade e tolerância, a cana-energia, principalmente quando cultivadas em solos marginais característicos de baixa fertilidade, podem sofrer com a deficiência de alguns nutrientes caso não ocorra adubações de correção, como é o caso do ferro (Fe) que é considerado um micronutriente altamente demandado pelas plantas.

## **2.2 A importância do ferro (Fe) para as plantas**

O ferro (Fe) é um micronutriente necessário para praticamente todos os organismos (PAULA, 2018). Para as plantas, é considerado elemento essencial pois atua em diversos mecanismos e processos vitais às plantas que, na ausência do elemento, não consegue completar seu ciclo de vida (BARBOSA FILHO et al., 1994). Apesar de ser relativamente abundante na maioria dos

solos, a disponibilidade do Fe para as plantas depende de algumas propriedades físico-químicas do solo (KOBAYASHI e NISHIZAWA, 2012).

A solubilidade do Fe diminui aproximadamente 1000 vezes a medida em que o valor de pH é elevado em uma unidade. Sendo assim, solos mais alcalinos tendem a apresentar uma baixa quantidade de Fe disponível para as plantas (BARBOSA FILHO et al., 1994). Podemos destacar também a alta oxidação do  $\text{Fe}^{2+}$  liberado pelos minerais primários, que dará origem aos óxidos de  $\text{Fe}^{3+}$ , característicos de baixa solubilidade (OLIVEIRA et al., 2013). Altas concentrações de alumínio e de outros nutrientes, como o manganês, nas plantas também podem reduzir a absorção do ferro e induzir sua deficiência (PAULA, 2018).

Para contornar a baixa disponibilidade do Fe nos solos, as plantas desenvolveram duas estratégias a fim de potencializar a absorção do micronutriente. A estratégia 1 consiste na redução do  $\text{Fe}^{3+}$  para  $\text{Fe}^{2+}$  através da acidificação da rizosfera, onde as plantas liberam  $\text{H}^+$  para o meio, o que a ativa enzima Ferro Quelato Redutase responsável pela redução do  $\text{Fe}^{3+}$  para  $\text{Fe}^{2+}$ . O  $\text{Fe}^{2+}$  é transportado para o interior das células por transportadores específicos presentes na membrana plasmática. A estratégia 1 ocorre principalmente nas monocotiledôneas não-gramíneas e nas dicotiledôneas (ALEXANDRE et al., 2012).

Na estratégia 2, compostos com alta afinidade ao ferro chamados de fitossideróforos são liberados pelas plantas na rizosfera, que se unem ao  $\text{Fe}^{3+}$  formando um complexo quelato ( $\text{Fe}^{3+}$ -FS) que será transportado por transportadores chamados de Yellow Stripe para o interior das células. A estratégia 2 ocorre em gramíneas como milho, aveia e cevada (ALEXANDRE et al., 2012 ; DECHEN e NACHTIGALL, 2007).

O Fe é absorvido principalmente por fluxo de massa. Nas plantas, a principal função do micronutriente é ser componente enzimático, participando principalmente em processos de oxirredução (KOBAYASHI e NISHIZAWA, 2012). São dois os principais grupos de proteínas que contém o Fe: as proteínas

com aglomerados de ferro-enxofre (Fe-S) e as contendo Fe-heme (KIRKBY e ROMHELD, 2007).

Podemos destacar, entre as proteínas Fe-S, a Ferredoxina que atua como transferidor de elétrons em processos como fotossíntese, redução do nitrito, fixação biológica do N<sub>2</sub> e redução do sulfato. Representado o grupo das hemeoproteínas, temos as enzimas catalase, peroxidase e citocromos, que também são importantes em processos como a respiração e a fotossíntese (FAQUIN, 2005). Aproximadamente 75% do ferro presente nas folhas estão nos cloroplastos e a deficiência do micronutriente pode reduzir em muito o processo fotossintético das plantas (BARBOSA FILHO et al., 1994).

O ferro é considerado imóvel nas plantas e os sintomas de sua deficiência surgem primeiro nas folhas mais novas com o amarelecimento das mesmas (DECHEN e NACHTIGALL, 2007). Na cultura da cana-de-açúcar, a falta de ferro ocasiona enraizamento mais superficial e clorose internerval, que são estrias paralelas e longitudinais nas folhas. Em casos mais severos, a clorose pode evoluir para estado necrótico, com o secamento das pontas (ORLANDO FILHO et al., 2015).

### **2.3 Uso do silício (Si) na atenuação da deficiência de ferro**

O Si é considerado elemento benéfico às plantas por relacionar-se a inúmeros efeitos indiretos, como aumento na capacidade fotossintética (FREITAS et al., 2011), aumento da resistência ao acamamento (RAMOS ; KORNDORFER ; NOLLA, 2008), redução da transpiração (PEREIRA et al., 2007), estímulo da resistência a pragas e doenças (CAMARGO, 2016), redução da toxicidade de alguns elementos como Mn e Al (BEZERRA, 2015) e o aumento na absorção de nutrientes como o P (SANTOS et al., 2021).

Considerado o segundo elemento mais abundante na superfície terrestre, perdendo apenas para o oxigênio (O) (EPSTEIN, 1999), o Si é o principal componente das rochas, dos minerais silicatados e dos solos, entretanto, seu

teor solúvel que fica disponível para as plantas pode ser baixo devido à mineralogia do solo, bem como sua textura e o teor de argila (CAMARGO, 2016). A utilização do solo de maneira intensiva na agricultura também pode contribuir para a redução do Si disponível às plantas (SANTOS, 2017).

Acredita-se que o Si seja absorvido preferencialmente por fluxo de massa pelas raízes na forma de ácido monossilícico ( $H_4SiO_4$ ), sendo transportado via xilema e depositado na epiderme das folhas e colmos na forma de dupla camada, tornando-se imóveis em relação à redistribuição para outros órgãos (CAMARGO, 2016). Apesar de vários estudos comprovarem os benefícios que o silício proporcionam as plantas, o elemento ainda não é considerado nutriente por não atenderem a todos os critérios, diretos e indiretos, de Arnon e Stout (CAMARGO, 2016).

As espécies da família *Poaceae*, como é o caso da cana-de-açúcar, são consideradas plantas acumuladoras de silício, uma vez que possuem transportadores específicos que são responsáveis pela absorção e transporte do Si das raízes para a parte aérea da planta (TEIXEIRA, 2018). Segundo Oliveira (2009), as plantas acumuladoras de Si podem apresentar teores acima de  $10,0 \text{ g kg}^{-1}$  de silício na matéria seca nas folhas, parte das plantas em que a concentração é maior, principalmente nas folhas mais velhas.

As escórias de siderurgia são as principais formas de fornecer Si aos solos, através dos silicatos de Ca e Mg (FREITAS et al., 2011). Além de fornecer uma boa quantidade de Si às plantas, esses resíduos também corrigem a acidez do solo e aumentam a disponibilidade dos macro e micronutrientes para as plantas (SILVA e PRADO, 2020). Entretanto, é importante atentar-se aos níveis de concentração de metais pesados que esses materiais podem conter (SOUSA ; KORNDORFER ; WANGEN, 2010).

Outras fontes de Si para as plantas vêm sendo estudadas nos últimos anos, como é o caso do silicato de potássio (K). A sua adição em solução nutritiva pode potencializar a absorção e o uso do Si pelas plantas uma vez que são totalmente solúveis em água, em ambientes com pH elevado (SARAH, 2018). Os resíduos de plantas também podem ser utilizados como fonte de Si, como a

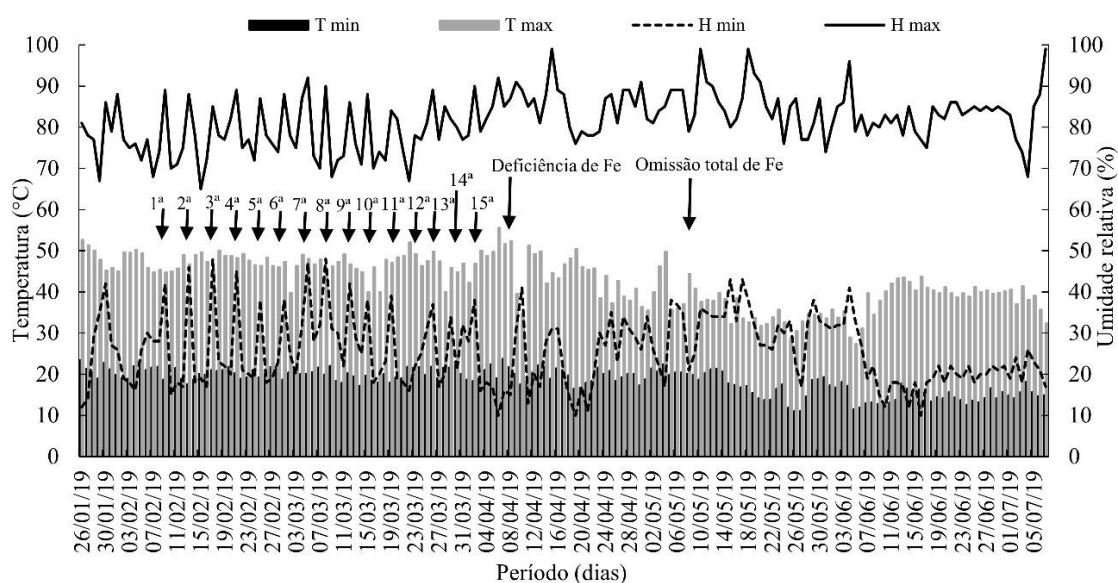
palha de arroz e o bagaço da cana, quando incorporados ao solo em grande quantidade (SANTOS, 2017).

No entanto, ainda não foi demonstrado o efeito do fornecimento de Si via solução nutritiva na mitigação dos danos causados pela deficiência férrica em plantas de cana-energia, que é acumuladora deste elemento benéfico.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação na Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus de Jaboticabal, no período de janeiro a julho de 2019, utilizando mudas pré-brotadas (MPB) de cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.), cultivar VX3. A cultivar utilizada foi selecionada devido ao grande uso nas áreas de cultivo, apresentando características agrônômicas importante como maior teor de fibra e menor sacarose (MARIANO, 2015).

A temperatura e umidade relativa foram medidas diariamente durante todo o experimento com o uso do termo-higrômetro (Figura1).



**Figura 1.** Valores de temperatura máxima e mínima ( $T_{\text{máx}}$  e  $T_{\text{mín}}$ ) do ar e umidade relativa ( $H_{\text{max}}$  e  $H_{\text{min}}$ ) no interior da casa de vegetação durante todo o experimento. As setas apresentam os respectivos dias em que o silício foi fornecido, bem como a imposição à deficiência férrica e omissão total do Fe na solução nutritiva.

### 3.1 Tratamento e Delineamento experimental

Os tratamentos foram configurados em esquema fatorial de 2 x 2, sendo o primeiro fator constituído pela suficiência e deficiência de Fe; e o segundo fator constituído pelo fornecimento de Si: ausência (-Si) e presença (+Si) de Si. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com cinco repetições.

#### Condução do experimento

Inicialmente, foi realizado o plantio dos mini-colmos em bandejas de produção de mudas preenchida com vermiculita fina. A solução nutritiva utilizada foi a de Hoagland e Arnon (1950) com alteração na concentração de ferro para  $368 \mu\text{mol L}^{-1}$  na forma de Fe-EDDHA, conforme indicação de Cavalcante et al. (2019). Para evitar a salinização do substrato, a concentração de sais da solução nutritiva durante a primeira semana de cultivo foi mantida a 25% de diluição e elevada para 50% da segunda semana até o fim do experimento. O volume de solução aplicado foi definido a partir de teste preliminar de saturação do substrato, evitando perda por lixiviação, sendo determinado como ideal a aplicação de 10 mL por muda utilizando uma proveta, uma vez ao dia. O valor pH da solução nutritiva foi mantido em  $5,5 \pm 0,2$  com o uso de solução de ácido clorídrico (HCl) ou hidróxido de sódio (NaOH) ambos a  $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ .

A concentração de Si utilizada foi de  $2,5 \text{ mmol L}^{-1}$  devido o elemento em solução começa a polimerizar a partir dos  $3 \text{ mmol L}^{-1}$  (Birchall, 1995). E a fonte de Si solúvel foi o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol ( $113,4 \text{ g L}^{-1}$  de Si e  $18,9 \text{ g L}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  e pH 11,8). Foram realizadas 15 fertirrigações de Si com intervalos de 4 dias, a partir de 10 dias após a emergência plena dos brotos (DAE), aplicando 10 mL por muda via substrato e 1,47 ml por muda via pulverização foliar usando um pulverizador manual.

O valor do pH da solução de Si fertirrigada foi mantido em  $5,5 \pm 0,2$ , porque a solução em pH ácido favorece aumento de espécies monoméricas de Si aumentando eficiência da absorção (Kudryavtsev and Figovsky, 2016). Foi realizado o equilíbrio da quantidade de potássio presente na fonte de Si nos tratamentos com ausência do elemento, utilizando uma solução de cloreto de potássio a  $1,0 \text{ mol L}^{-1}$  com aplicação via radicular e por pulverização foliar.

Aos 60 DAE, as mudas foram transplantadas para vasos plásticos de  $7,0 \text{ dm}^3$  preenchidos com  $5,5 \text{ dm}^3$  de areia grossa previamente lavada com água, solução de HCl (1%) e água deionizada. No transplântio, as mudas tinham seis folhas completamente desenvolvidas e foi realizado o corte a 30 cm da bainha da última folha completamente desenvolvida, ou seja, próximo de um terço das folhas foram removidas, sendo uma prática comum em viveiros de mudas com o objetivo de diminuir a perda de vapor de água por transpiração no momento do transplântio para solo (Landell et al., 2012).

Após o transplântio, as plantas foram submetidas à deficiência nutricional. Para a condição de suficiência, a concentração de Fe foi mantida em  $368 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$  (Cavalcante et al., 2016). Para a condição de deficiência moderada, a concentração de Fe inicialmente foi de  $55,2 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$ , o que corresponde a 61% da concentração recomendada por Hoagland and Arnon (1950). Após 30 dias, o Fe foi totalmente omitido da solução por um período de 60 dias até a colheita.

As plantas do tratamento com fornecimento de Si continuaram a receber o elemento durante a fase de deficiência nutricional na mesma concentração e fonte da fase de formação das mudas. O valor do pH da solução nutritiva foi diariamente ajustado antes da aplicação nos vasos. O fornecimento da solução nutritiva foi constante, mantendo a umidade do substrato. Os substratos foram frequentemente lavadas com água deionizada para evitar o acúmulo de sais.

### **3.2 Variáveis analisadas**

### **3.2.1 Eficiência quântica do fotossistema II (PSII)**

As medições fotossintéticas do rendimento quântico do PSII foram realizadas entre 7 e 8h da manhã, as folhas foram submetidas a um período de adaptação ao escuro usando pinças do aparelho e intensidade de saturação de 3500  $\mu\text{mol}$  por um período de 30 minutos. As medidas foram realizadas na primeira folha completamente expandida de cada planta e determinado utilizando fluorômetro portátil (Opti-sciences – Os30P) (Lichtenthaler et al., 2005).

### **3.2.2 Conteúdo de clorofilas e carotenoides**

Cinco discos foliares de 6 mg foram coletados no terço médio da lâmina foliar da folha zero e da quarta folha completamente desenvolvida, conforme metodologia proposta por Lichtenthaler (1987). As leituras foram realizadas em espectrofotômetro (Beckman DU 640) a 663 nm para clorofila a (Cha), 647 nm para clorofila b (Chb) e 470 nm para carotenóides, sendo o conteúdo definido com base na matéria fresca.

### **3.2.3 Índice de extravasamento de eletrólitos**

Foram coletados dez discos foliares da primeira folha completamente desenvolvida e emergidos em água deionizada por 2 horas, sendo a condutividade elétrica (EC1) da solução lida usando um medidor de condutividade (TDS-3). As amostras foram autoclavadas a 121°C por 20 min e após o resfriamento a condutividade elétrica final (EC2) foi obtida. O extravasamento de eletrólitos foi determinado considerando a fórmula:  $EC1/EC2 \times 100$  (Dionisio-Sese and Tobita, 1998).

### **3.2.4 Produção de massa seca**

As plantas foram separadas em folhas velhas, folhas intermediárias, folhas novas, colmo e raízes, depois foram lavadas em água corrente solução detergente (0,1% v/v), solução de HCl (0,3% v/v) e água deionizada, respectivamente. O material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar ( $65 \pm 5^\circ\text{C}$ ), até atingir uma massa constante. A massa seca de cada parte da planta foi obtida a partir da pesagem em balança analítica.

### 3.2.5 Concentração de Si

O teor de Si foi analisado nas folhas velhas, folhas intermediárias, folhas novas, colmo e raízes a partir da extração de acordo com a metodologia descrita por Kraska and Breitenbeck (2010), com leitura realizada por espectrofotômetro a 410 nm, conforme indicado por Korndörfer et al. (2004). Com base no teor de Si e na matéria seca, foi calculado o acúmulo de Si em cada parte da planta.

### 3.2.6 Concentração de Fe

Os teores de Fe foram determinados nas folhas velhas, intermediárias, novas, colmo e raízes após a extração, usando o método descrito por Bataglia et al. (1983). O acúmulo do micronutriente foi calculado de acordo com a sua concentração e a massa seca de cada parte da planta.

### 3.2.7 Eficiência na absorção, translocação e utilização do ferro

A eficiência de absorção, transporte e utilização de Fe, foi medida com base no acúmulo desses micronutrientes e na massa seca da planta, conforme descrito por Fageria e Baligar (2005).

***Eficiência de absorção*** = (acúmulo do nutriente na planta inteira) / (matéria seca total nas raízes).

***Eficiência de transporte*** = ((acúmulo do nutriente na parte aérea da planta) / (acúmulo do nutriente na planta inteira)) x100.

***Eficiência de utilização*** = (matéria seca total produzida)<sup>2</sup> / (acúmulo total do nutriente na planta inteira).

## 3.3 Análise estatística

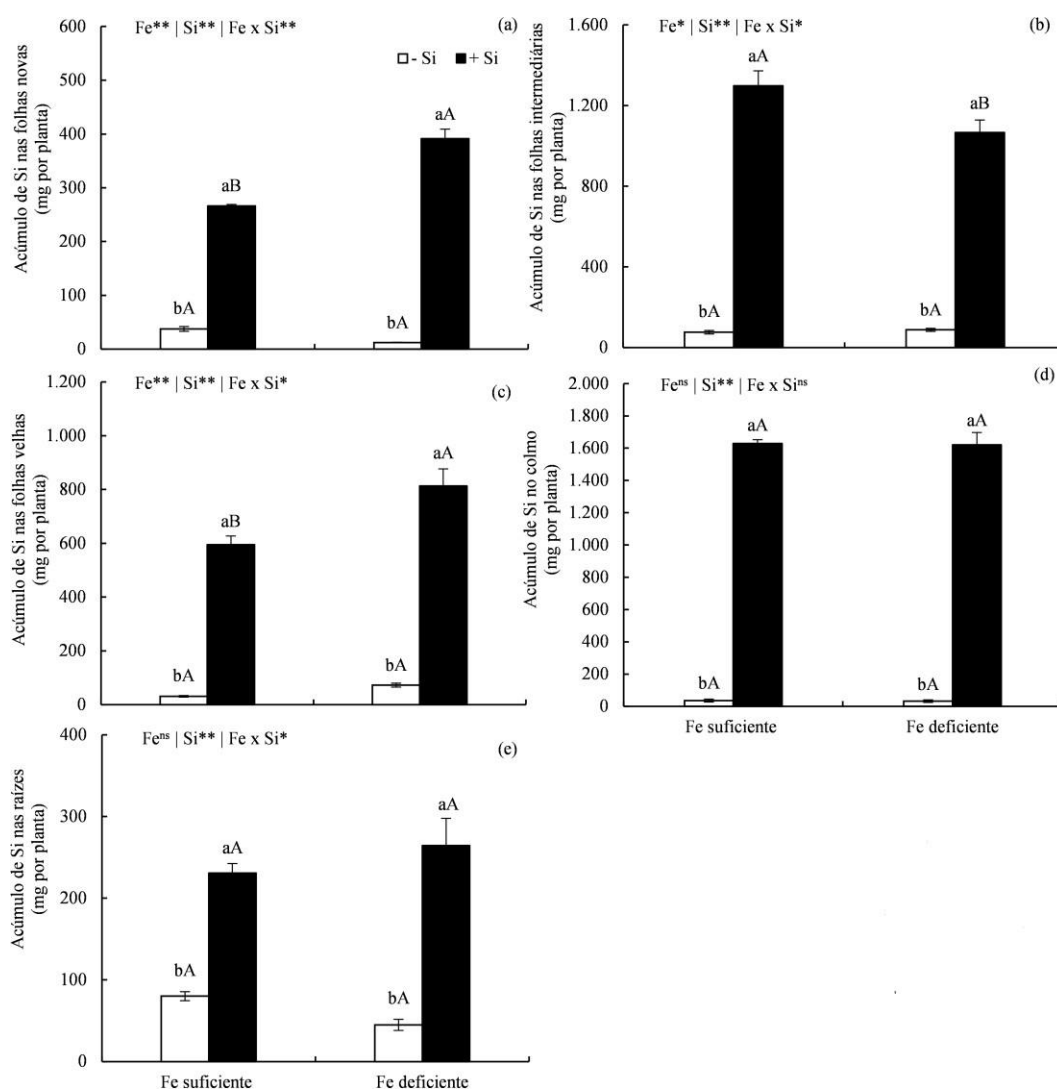
Os dados foram submetidos a uma análise de variância bidirecional (ANOVA) pelo teste F ( $p \leq 0,05$ ) após verificação da homogeneidade das variâncias (teste W de Shapiro-Wilks). Uma análise fatorial foi utilizada para testar os principais efeitos dos tratamentos com silício (Si) e ferro (Fe), bem como suas interações (Si × Fe). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey, com 5% de probabilidade, usando o software estatístico Agroestat (BARBOSA e MALDONADO JÚNIOR, 2010).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O fornecimento do Si via solução nutritiva e pulverização foliar aumentou o acúmulo do elemento em todas as partes das plantas, tanto nas condições de suficiência e deficiência moderada do micronutriente ferro (Figura 2). O acréscimo no acúmulo de Si na cana-energia é devido ao fato de a planta, pertencente à família *Poaceae*, ser considerada acumuladora do elemento, uma vez que as gramíneas possuem transportadores específicos que auxiliam na absorção e transporte do Si das raízes para as outras partes da planta (KORNDÖRFER et al., 1999 ; TEIXEIRA, 2018).

A ótima absorção de Si pela planta se deve também a qualidade da solução aplicada, com concentração adequada ( $2,5 \text{ mmol L}^{-1}$ ) que não favorece polimerização (BIRCHALL, 1995) e pelo pH ácido da solução que favorece o aumento de espécies monoméricas de Si ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) (KUDRYAVTSEV e FIGOVSKY, 2016), favorecendo sua absorção (RAVEN, 1983).

No tratamento -Fe +Si, o colmo foi a parte da planta onde apresentou maior acúmulo de Si, com aproximadamente 1.600 mg por planta. Já as raízes apresentaram o menor valor, com cerca de 260 mg. Os valores acumulados em todas as partes das plantas podem ser observados na figura abaixo (Figura 2a-e).



**Figura 2.** Acúmulo de silício (Si) nas folhas novas (a), folhas intermediárias (b), folhas velhas (c), colmo (d) e raízes (e) nas condições de suficiência e deficiência de ferro (Fe), associado à ausência (-Si) e presença (+Si) de Si em plantas de cana-energia cultivar VX3. \*: significativo com 1% de probabilidade, \*\*: significativo 5% de probabilidade e ns: não significativo pelo teste-F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si sob condição de Fe semelhante e letras maiúsculas em relação ao Fe sob condição de Si semelhante pelo teste de Tukey. Barras representam o erro padrão da média.

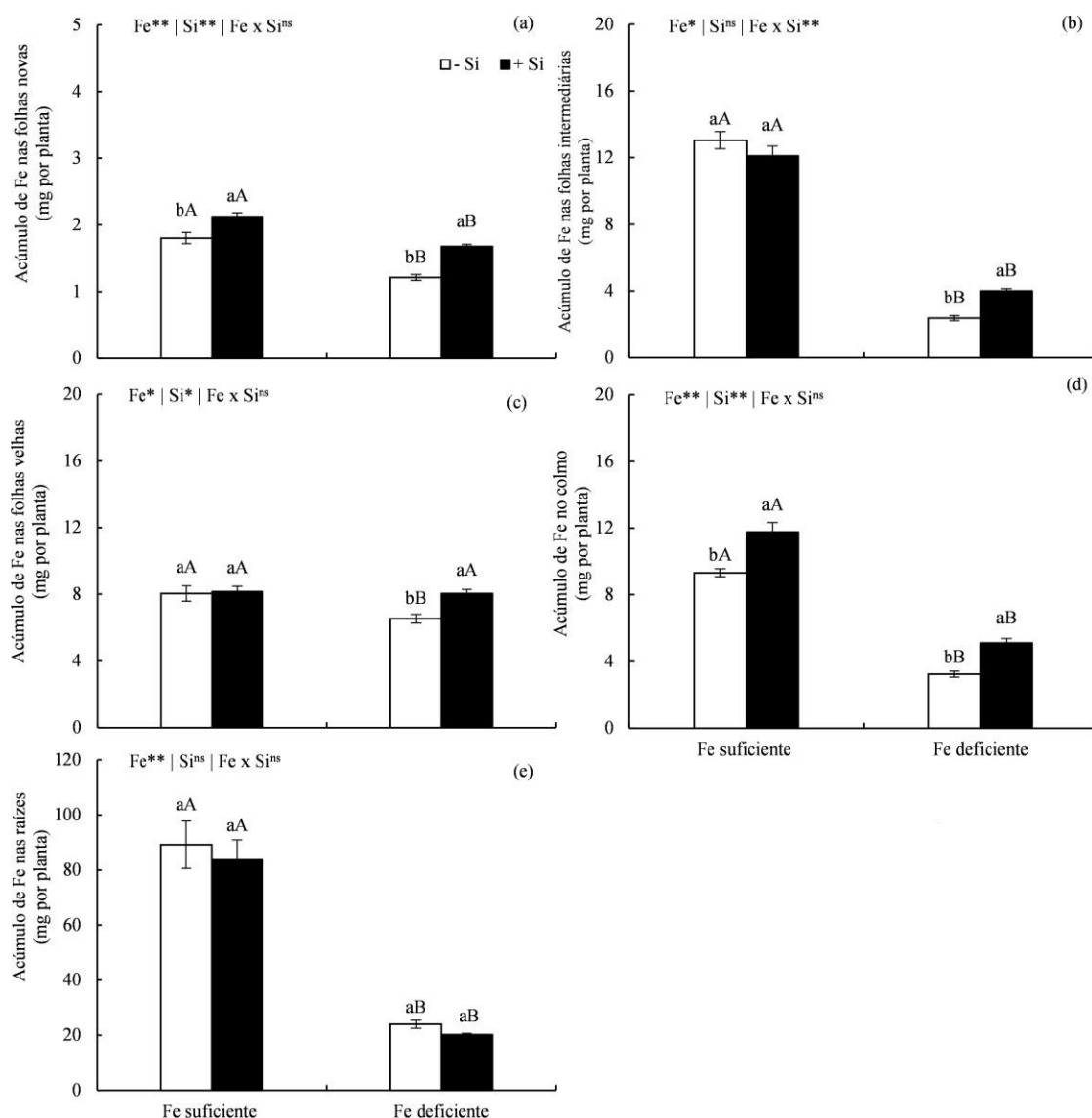
As plantas de cana-energia que foram submetidas à condição de deficiência de Fe apresentaram uma queda no acúmulo do micronutriente em todas as partes quando comparadas às plantas condicionadas à suficiência de

Fe. A raiz foi a parte da planta onde o acúmulo de Fe apresentou maior valor, independentemente dos quatro tratamentos realizados (+Fe +Si; +Fe – Si; -Fe + Si e -Fe -Si) (Figura 3).

O ferro, apesar de presente em grandes concentrações no solo, tem baixa disponibilidade para as plantas, uma vez que se encontra, na maioria das vezes, na forma de óxidos e hidróxidos de  $Fe^{3+}$ , característicos de solubilidade baixa (MIELKI, 2014). Sendo assim, é comum plantas de cana-energia apresentarem deficiência férrica, mesmo que de forma menos acentuada.

As plantas sob deficiência férrica que foram adicionadas o Si, apresentou-se um aumento no acúmulo de Fe nas folhas novas, intermediárias e velhas e nos colmos, com exceção das raízes (Figura 3). A atividade dos transportadores de Si aumentada com o uso do elemento potencializou também a absorção de Fe e, conseqüentemente, o acúmulo do micronutriente na planta.

Sendo assim, constatou-se que o uso do Si na solução nutritiva aumentou o acúmulo de Fe por parte da planta e amenizou os danos causados pela deficiência férrica, responsável pela clorose internerval e o enraizamento mais superficial (ORLANDO FILHO et al., 2015). Vale ressaltar também que o ferro possui como principal função nas plantas a constituição em diversas enzimas e proteínas que estão ligados a processos vitais para as plantas ( BARBOSA FILHO et al., 1994).



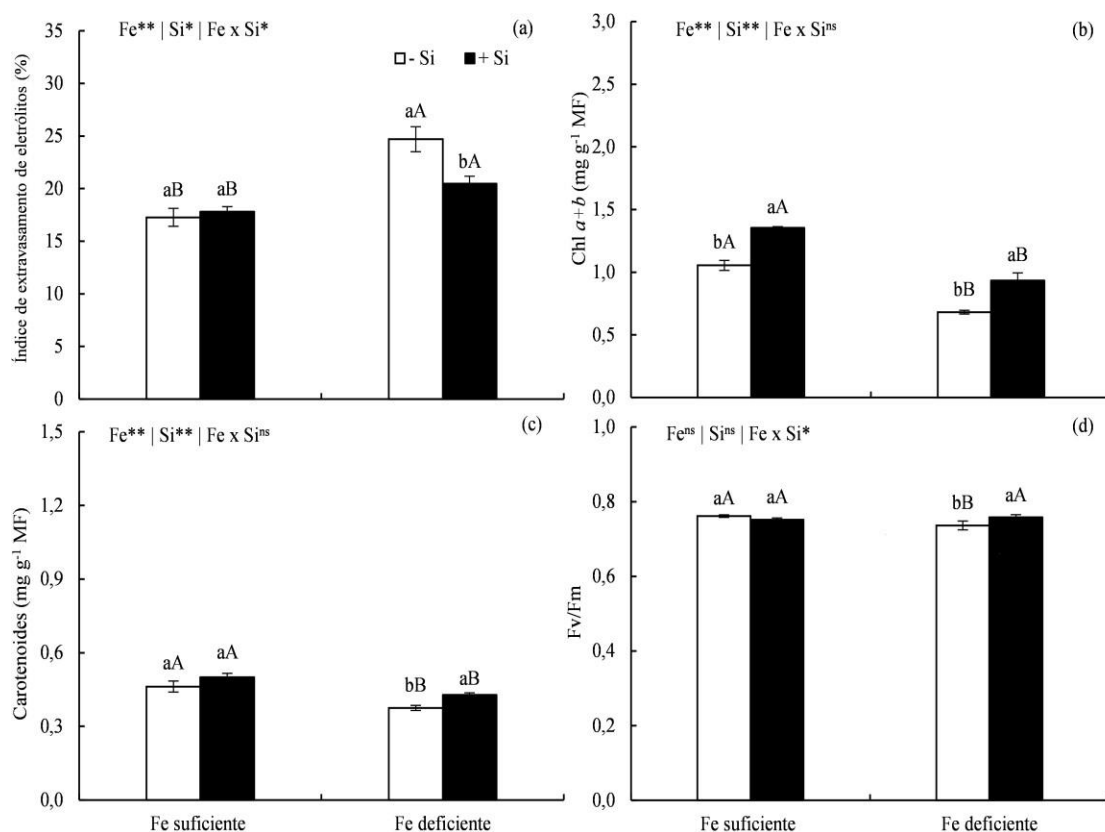
**Figura 3.** Acúmulo de ferro (Fe) nas folhas novas (a), folhas intermediárias (b), folhas velhas (c), colmo (d) e raízes (e) nas condições de suficiência e deficiência de ferro (Fe), associado à ausência (-Si) e presença (+Si) de Si em plantas de cana-energia da cultivar VX3. \*: significativo com 1% de probabilidade, \*\*: significativo com 5% de probabilidade e ns: não significativo pelo teste-F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si sob condição de Fe semelhante; e letras maiúsculas em relação ao Fe sob condição de Si semelhante pelo teste de Tukey. Barras representam o erro padrão da média.

As plantas submetidas à deficiência férrica apresentaram redução na concentração do micronutriente no tecido foliar, afetando a integridade das membranas e, como consequência, potencializou o extravasamento de

eletrólitos celulares. Entretanto, o uso do Si nas plantas com Fe deficiente diminuiu o estresse oxidativo, reduzindo o índice de extravasamento (Figura 4a). Isso acontece pois o Si está ligado diretamente na melhora da atividade antioxidante das plantas, reduzindo a peroxidação lipídica das folhas e auxiliando na proteção contra os danos oxidativos (JIAO-JING et al., 2009).

A deficiência de Fe também ocasionou a diminuição da concentração de carotenoides e das clorofilas a e b (Cha e Chb). Com o uso do Si e o aumento do acúmulo de Fe nas folhas, a concentração desses pigmentos aumentaram. (Figura 4b-c). Grande parte do Fe presente nas folhas está localizado no interior dos cloroplastos, lugar onde ocorre a síntese de clorofila (BARBOSA FILHO et al., 1994). Sendo assim, o aumento da concentração de clorofilas e carotenoides nas plantas sob deficiência férrica é resultado da utilização do Si via solução nutritiva e pulverização foliar.

O aumento da concentração das clorofilas melhorou a eficiência das plantas de cana-energia em realizar a fotossíntese, mantendo-se semelhantes aos números na condição de suficiência de ferro (Figura 4d).

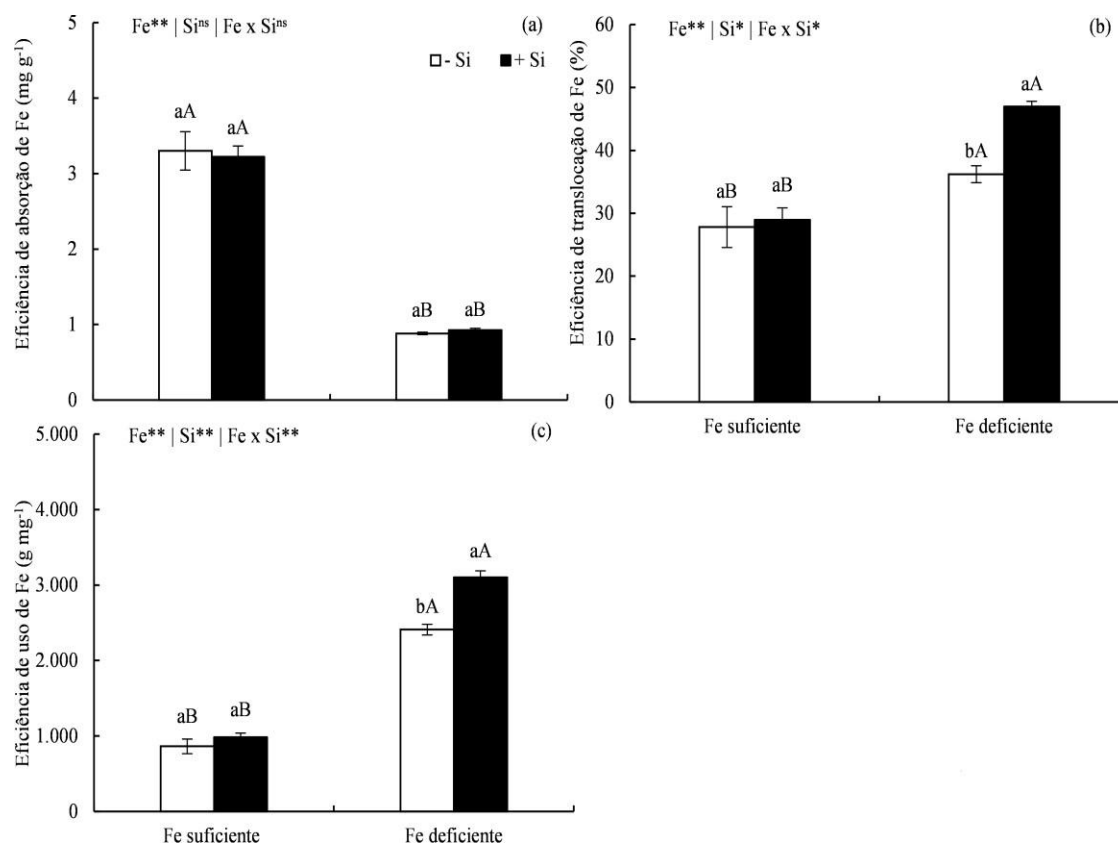


**Figura 4.** Índice de extravasamento de eletrólitos (a), conteúdo de clorofila total (Chl a+b), carotenoides (c) e eficiência fotossintética (Fv/Fm) (d) nas condições de suficiência e deficiência de ferro (Fe), associado à ausência (-Si) e presença (+Si) de Si em plantas de cana-energia da cultivar VX3. \*: significativo com 1% de probabilidade, \*\*: significativo com 5% de probabilidade e ns: não significativo pelo teste-F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si sob condição de Fe semelhante; e letras maiúsculas em relação ao Fe sob condição de Si semelhante pelo teste de Tukey. Barras representam o erro padrão da média.

A eficiência fotossintética, como consequência, também foi afetada com a falta do micronutriente, que é constituinte de importantes enzimas, como a peroxidase e a catalase, fundamentais para a manutenção do sistema fotossintético (KIRKBY e RÖMHELD, 2007). Com o uso do Si e o aumento do acúmulo de Fe, a síntese de clorofilas aumentou e a capacidade fotossintética das plantas também.

Nas plantas de cana-energia submetidas à deficiência do ferro, a eficiência de absorção do Fe reduziu de 3,2 para 0,8 mg.g<sup>-1</sup> quando comparadas às plantas com Fe suficiente e o emprego do silício não gerou mudanças

significativas (Figura 5a). Por outro lado, a imposição da deficiência férrica aumentou consideravelmente as eficiências de translocação e utilização do Fe, uma vez que as plantas quando submetidas ao estresse pela falta do micronutriente aumentam a eficiência de translocar e utilizar o Fe.

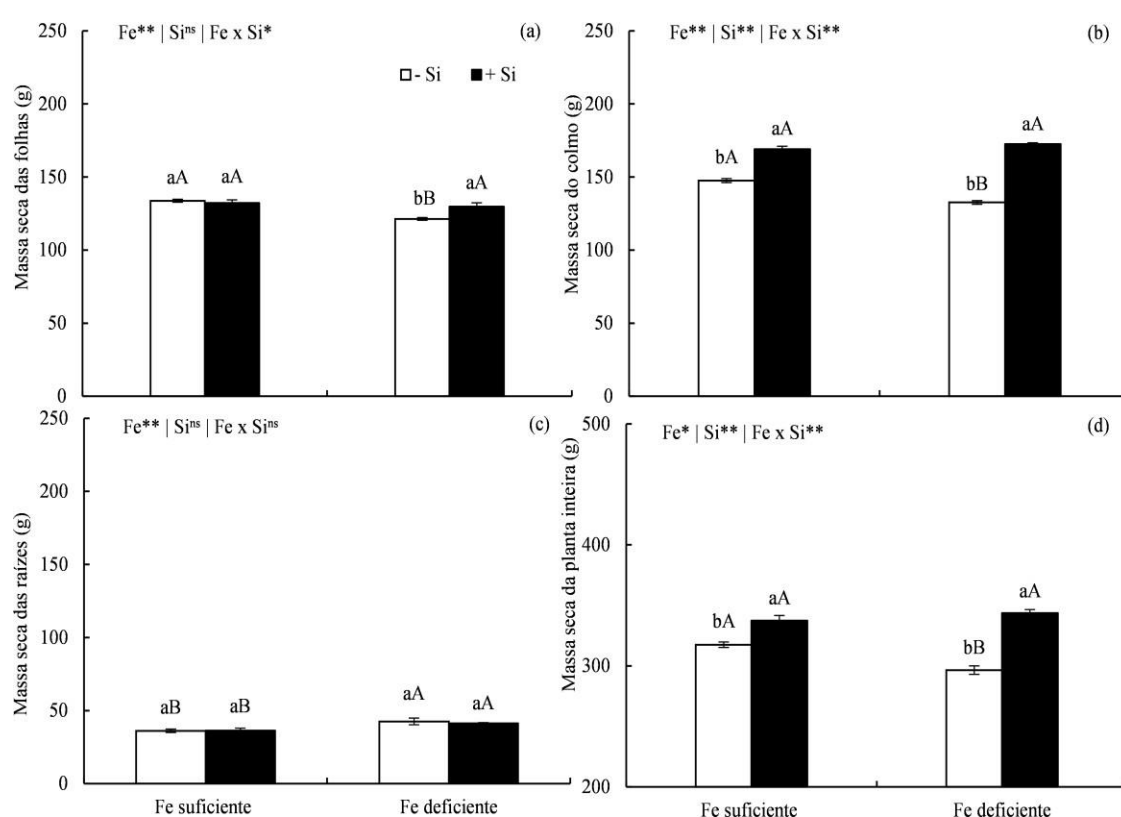


**Figura 5.** Eficiência de absorção (a), translocação (b) e utilização do ferro (Fe) (c) nas condições de suficiência e deficiência de ferro (Fe), associado à ausência (-Si) e presença (+Si) de Si em plantas de cana-energia da cultivar VX3. \*: significativo com 1% de probabilidade, \*\*: significativo com 5% de probabilidade e ns: não significativo pelo teste-F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si sob condição de Fe semelhante; e letras maiúsculas em relação ao Fe sob condição de Si semelhante pelo teste de Tukey. Barras representam o erro padrão da média.

A imposição da deficiência férrica reduziu o teor de massa seca nas folhas, mas quando adicionado o Si o valor se assemelhou aos valores em condição de suficiência do ferro (Figura 6a). Nos colmos, a massa seca

apresentou queda quando submetida à falta do micronutriente. Com o uso do Si, esse valor aumentou, se assemelhando aos valores obtidos na suficiência do Fe (Figura 6b). A massa seca das raízes apresentou-se superior nos dois tratamentos submetidos à deficiência moderada de Fe (Figura 6c).

Quando considerada a planta inteira, o valor de massa seca sofreu uma queda nas plantas deficientes de ferro. Entretanto, a utilização do Si na solução nutritiva aumentou o valor, assemelhando-se aos tratamentos com Fe suficiente (Figura 6d).



**Figura 6.** Massa seca das folhas (a), do colmo (b), das raízes (c) e da planta inteira (d) nas condições de suficiência e deficiência de ferro (Fe), associado à ausência (-Si) e presença (+Si) de Si em plantas de cana-energia da cultivar VX3. \*: significativo com 1% de probabilidade, \*\*: significativo com 5% de probabilidade e ns: não significativo pelo teste-F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si sob condição de Fe semelhante; e letras maiúsculas em relação ao Fe sob condição de Si semelhante pelo teste de Tukey. Barras representam o erro padrão da média.

## **5. CONCLUSÃO**

A cana-energia é sensível à deficiência férrica prejudicando o seu crescimento ao causar estresse e a degradação de pigmentos diminuindo a eficiência fotossintética.

O fornecimento de Si atenua a deficiência férrica ao aumentar o acúmulo de Fe, diminuindo o estresse das plantas favorecendo a eficiência nutricional e fotossintética e, conseqüentemente, a produção de massa seca.

## Referências Bibliográficas

ALEXANDRE, Juliana R. et al. Zinco e ferro: de micronutrientes a contaminantes do solo. *Natureza on line*, v. 10, n. 1, p. 23-28, 2012.

BARBOSA FILHO, Morel Pereira; DYNIA, José Flavio; FAGERIA, Nand Kumar. Zinco e ferro na cultura do arroz. Embrapa Arroz e Feijão-Documentos (INFOTECA-E), 1994.

BARBOSA, J. C.; MALDONADO JUNIOR, W. AgroEstat-sistema para análises estatísticas de ensaios agronômicos. Versão 1.0. Jaboticabal: Departamento de Ciências Exatas, 2010.

BARROS, Leonardo Rodrigues et al. Eficiência de biofertilizante oriundo da metanogênese na cana energia. 2020.

BATAGLIA, O.C.; FURLANI, A.M.C.; TEIXEIRA, J.P.F.; FURLANI, P.R.; GALLO, J.R. Métodos de análise química de plantas Campinas: Instituto Agrônomo, 1983. 48p. (Boletim Técnico, 78)

BEZERRA, Breno Kennedy Lima. Adubação com silício e tolerância ao déficit hídrico em cana-de-açúcar. 2015.

BIRCHALL, J. D. The essentiality of silicon in biology. **Chemical Society Reviews**, v. 24, n. 5, p. 351-357, 1995.

CAVALCANTE, V. S; PRADO R. M; VASCONCELOS, R. V; CAMPOS, C. N. S. Iron concentrations in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) cultivated in nutrient solution. *Agrociência*. 50: 867-875, 2016

CAVERSAN, Amanda Suellen. Modelo matemático para planejamento do plantio e colheita da cana-de-açúcar e da cana-energia. 2017.

DECHEN, Antônio Roque; NACHTIGALL, Gilmar Ribeiro. Elementos requeridos à nutrição de plantas. Embrapa Uva e Vinho-Capítulo em livro científico (ALICE), 2007.

DE CAMARGO, Mônica Sartori. Efeito do silício na tolerância das plantas aos estresses bióticos e abióticos. 2016.

DIONISIO-SESE, Maribel L.; TOBITA, Satoshi. Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. **Plant Science**, v. 135, n. 1, p. 1-9, 1998.

DOS SANTOS, Leônidas Canuto et al. O papel do silício nas plantas. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 7, p. e3810716247-e3810716247, 2021.

EPSTEIN, Emanuel. Silicon. *Annual review of plant biology*, v. 50, n. 1, p. 641-664, 1999.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. **Advances in agronomy**, v. 88, p. 97-185, 2005.

FAQUIN, Valdemar. Nutrição mineral de plantas. 2005.

FREITAS, Lucas Barbosa de et al. Adubação foliar com silício na cultura do milho. *Revista Ceres*, v. 58, p. 262-267, 2011.

GONZALO, M. J., LUCENA, J. J., and HERNÁNDEZ-APAOLAZA, L. (2013). Plant physiology and biochemistry effect of silicon addition on soybean (*Glycine max*) and cucumber (*Cucumis sativus*) plants grown under iron deficiency. *Plant Physiol. Biochem.* 70, 455-461. doi:10.1016/j.plaphy.2013.06.007.

GOUSSAIN, Marcio M. et al. Efeito da aplicação de silício em plantas de milho no desenvolvimento biológico da lagarta-do-cartucho *Spodoptera frugiperda* (JE Smith)(Lepidoptera: Noctuidae). *Neotropical Entomology*, v. 31, p. 305-310, 2002.

GUERINOT, M. L., and YI, Y. (1994). Iron: nutritive, noxious, and not readily available. *Plant Physiol.* 104, 815-820. doi:10.1104/pp.104.3.815.

HOAGLAND, Dennis Robert et al. The water-culture method for growing plants without soil. **Circular. California agricultural experiment station**, v. 347, n. 2nd edit, 1950.

JIAO-JING L, SHAO-HANG L, PEI-LEI X, XIU-JUAN W, JIGANG B. Effects of exogenous silicon on the activities of antioxidant enzymes and lipid peroxidation in chillingstressed Cucumber leaves. *Agr. Sci. China* v.8, p.1075- 1086, 2009.

KIRKBY, Ernest Arnold; RÖMHELD, Volker. Micronutrientes na fisiologia de plantas: funções, absorção e mobilidade. *Informações agronômicas*, v. 118, n. 2, p. 1-24, 2007.

KOBAYASHI, Takanori; NISHIZAWA, Naoko K. Iron uptake, translocation, and regulation in higher plants. *Annual review of plant biology*, v. 63, p. 131-152, 2012.

KORNDÖRFER, G. K.; DATNOFF, L. E.; CORRÊA, G. F. Influence of silicon on grain discoloration and upland rice grown on four savanna soils of Brazil. *Journal of plant nutrition*, v. 22, n. 1, p. 93-102, 1999.

KORNDÖRFER-UFU, Gaspar Henrique; NOLLA-UFU, Antonio. **CORREÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO COM A SILICATAGEM**. 2004.

KRASKA, Joseph E.; BREITENBECK, Gary A. Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 41, n. 17, p. 2075-2085, 2010.

KUDRYAVTSEV, P. G., and FIGOVSKY, O. L. (2016). Nanocomposite organomineral hybrid materials. Part I. Nanotechnologies Constr. A Sci. Internet-Journal 8, 16-49. doi:10.15828/2075-8545-2016-8-3-16-56.

KUDRYAVTSEV, P. G.; FIGOVSKY, O. L. System of storage and hydrogen generation for power propulsion systems and cars. **Alternative Energy and Ecology (ISJAE)**, n. 13-14, p. 46-55, 2016.

Landell, M. G. A., Campana, M. P., Figueiredo, P. Sistema de Multiplicação de cana-de-açúcar com uso de mudas pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas. Campinas: Instituto Agrônomo. Documentos IAC, p. 109, 2012

Leal, M. R. L. V., Walter, A. S., and Seabra, J. E. A. (2013). Sugarcane as an energy source. Biomass Convers. Biorefinery 3, 17-26. doi:10.1007/s13399-012-0055-1.

LICHTENTHALER, H. K.; BUSCHMANN, C.; KNAPP, M. How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio RFd of leaves with the PAM fluorometer. Photosynthetica, v. 43, n. 3, p. 379-393, 2005.

MARIANO, Adriano Pinto et al. Butanol production in a first-generation Brazilian sugarcane biorefinery: technical aspects and economics of greenfield projects. **Bioresource technology**, v. 135, p. 316-323, 2013.

MARIANO, J. Cana-energia, a revolução sucroenergética está começando. Publicado em 20 de out. de 2015. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/cana/variedades/especial-cana-energia-revolucao-sucroenergetica-201015/> Acesso em: 15 de julho de 2021.

MATSUOKA, Sizuo et al. Bioenergia da cana. Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e álcool, v. 1, p. 548-576, 2012.

MATSUOKA, Sizuo et al. Energy cane: its concept, development, characteristics, and prospects. Advances in Botany, v. 2014, 2014.

MIELKI, Guilherme Furlan. Disponibilidade de ferro em solos tropicais e sua absorção pela planta. 2014.

MIYAKE, Yasuto; TAKAHASHI, Eiichi. Effect of silicon on the growth of soybean plants in a solution culture. Soil science and plant nutrition, v. 31, n. 4, p. 625-636, 1985.

MUNEER, Sowbiya; JEONG, Byoung Ryong. Silicon decreases Fe deficiency responses by improving photosynthesis and maintaining composition of thylakoid multiprotein complex proteins in soybean plants (*Glycine max* L.). Journal of plant growth regulation, v. 34, n. 3, p. 485-498, 2015.

OKUNO, Fábio Makoto et al. Technical and economic parameters of sugarcane straw recovery: baling and integral harvesting. **BioEnergy Research**, v. 12, n. 4, p. 930-943, 2019.

OKUNO, Fábio Makoto. **Desempenho econômico de um sistema de produção de biomassa da cana energia**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

OLIVEIRA, Lilian Aparecida de. Silício em plantas de feijão e arroz: absorção, transporte, redistribuição e tolerância ao cádmio. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

OLIVEIRA, Luiz CA; FABRIS, José D.; PEREIRA, Márcio C. Óxidos de ferro e suas aplicações em processos catalíticos: uma revisão. *Química Nova*, v. 36, n. 1, p. 123-130, 2013.

ORLANDO FILHO, Segundo et al. USO DE MICRONUTRIENTES EM CANA-DE-AÇÚCAR.

PAULA, Lucélia de Sousa et al. Ação dos brassinosteróides sobre a fluorescência de clorofilas e trocas gasosas em plantas de soja sob deficiência de ferro. 2018.

PEREIRA, Hamilton Seron et al. Avaliação de fontes e de extratores de silício no solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 42, p. 239-247, 2007.

RAMOS, Lucélia Alves; KORNDÖRFER, Gaspar Henrique; NOLLA, Antonio. Acúmulo de silício em plantas de arroz do ecossistema de várzea submetido à aplicação de diferentes fontes. *Bragantia*, v. 67, p. 751-757, 2008.

RAVEN, J. A. (1983). The transport and function of silicon in plants. *Biol. Rev.* 58, 179-207. doi:10.1111/j.1469-185x.1983.tb00385.x.

SANTOS, Gustavo Alves et al. Silício na produção de cana-de-açúcar. 2017.

SARAH, Marcilene Machado dos Santos. Silício como mitigador da deficiência de potássio em feijoeiro. 2018.

SILVA, Gilmara Pereira; MELLO PRADO, Renato. Estado nutricional da cana-de-açúcar em função da aplicação de nitrogênio e silício. *Acta Tecnológica*, v. 15, n. 1, p. 27-38, 2021.

SILVEIRA, Giovanni Módolo. Curvas de maturação em cana energia. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SOUSA, Robson Thiago Xavier de; KORNDÖRFER, Gaspar Henrique; WANGEN, Dalcimar Regina Batista. Aproveitamento de silício proveniente de escória siderúrgica por cultivares de cana-de-açúcar. *Bragantia*, v. 69, p. 669-676, 2010.

SOUSA JUNIOR, Gilmar da Silveira. Adição de silício na atenuação da toxicidade de alumínio nos teores de lignina, nutrição, trocas gasosas e sistema antioxidante de cana-de-açúcar. 2020.

TEIXEIRA, Gelza Carliane Marques et al. Silicon increases leaf chlorophyll content and iron nutritional efficiency and reduces iron deficiency in sorghum plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 20, n. 3, p. 1311-1320, 2020.

TEIXEIRA, Gelza Carliane Marques. Silício na mitigação do déficit hídrico de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar na fase inicial de crescimento. 2018.

VIOLANTE, Mauro Henrique Salgueiro Rodrigues. **Potencial de produção de cana-energia em áreas agrícolas marginais no Brasil**. 2012. Tese de Doutorado.

VITTI, Godofredo Cesar; OTTO, R.; FERREIRA, L. R. P. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar. Bebedouro, SP:[sn], p. 15-18, 2005.

YANAGUI, Karina et al. Genômica e transcritômica de "Saccharum spontaneum" e seus híbridos= novas perspectivas para compreender a formação da biomassa lignocelulósica. 2016.